

Hydraulic contacts identification in the aquifers of limestone ridges: tracer tests in the Montelago pilot area (Central Apennines)

Individuazione dei contatti idraulici negli acquiferi delle dorsali carbonatiche: prove di tracciamento nell'area campione di Montelago (Appennini centrali)

Alberto Tazioli, Lucia Aquilanti, Francesca Clementi, Mirco Marcellini, Torquato Nanni, Stefano Palpacelli, Paola Maria Vivalda

Riassunto: L'area in studio, appartenente al dominio carbonatico umbro-marchigiano, è caratterizzata da un assetto geo-strutturale molto complesso e dalla diffusa presenza di fenomeni carsici che rendono complicata la definizione dei rapporti tra le varie idrostrutture e i diversi acquiferi basandosi solamente su rilievi idro-geologici. Per verificare la presenza di determinati circuiti sotterranei tra acquiferi diversi della sequenza idrostratigrafica umbro-marchigiana e di contatti idraulici di origine tettonica tra le differenti idrostrutture, sono state eseguite prove con traccianti artificiali. In particolare, si è dimostrato che Calcarea Massiccio e Maiolica sono in connessione idraulica quando esistono determinate condizioni dovute alla tettonica. Le prove di tracciamento sono state eseguite utilizzando sia traccianti fluorescenti

tradizionali (fluoresceina e Tinopal CBS-X) sia molecole di DNA a singolo filamento, immessi nell'inghiottitoio di Montelago in diversi periodi dell'anno (compresi tra la ricarica e l'esaurimento del sistema carsico) e rilevati in diversi punti mediante campionamento manuale ed automatico. All'interno di sorgenti, ruscelli e fiumi sono stati inoltre posizionati fuocaptori per una determinazione qualitativa delle direzioni di flusso. Il vantaggio del DNA risiede soprattutto nella sua determinazione anche a concentrazioni molto basse o in presenza di grandi volumi di flusso. I risultati ottenuti hanno evidenziato l'idoneità del DNA come tracciante idrogeologico, utile nella individuazione sia di contatti idraulici tra diversi acquiferi ed idrostrutture sia di circuiti idrici sotterranei caratterizzati da considerevoli volumi di flusso come nei sistemi carsici. Nel contempo, l'uso dei traccianti tradizionali ha da un lato confermato le direzioni di deflusso sotterraneo individuate con il DNA, dall'altro ha permesso una accurata stima dei parametri idrogeologici degli stessi acquiferi.

Parole chiave: test con traccianti, DNA, carsismo, acquiferi, Montelago.

Keywords: tracer tests, DNA, karst, aquifers, Montelago area.

Alberto TAZIOLI ✉

Department of Materials, Environmental Sciences and UrbanPlanning (SIMAU)
Università Politecnica delle Marche
via Breccie Bianche 12, 60131 Ancona, Italy
Tel: +39.071.2204719 - Fax: +39.071.2204729
a.tazioli@staff.univpm.it

**Mirco MARCELLINI, Torquato NANNI,
Stefano PALPACELLI, Paola Maria VIVALDA**

Department of Materials, Environmental Sciences and UrbanPlanning (SIMAU)
Università Politecnica delle Marche
via Breccie Bianche 12, 60131 Ancona, Italy

Lucia AQUILANTI, Francesca CLEMENTI

Department of Agricultural, Food and Environmental Sciences
Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italy.

Ricevuto: 26 maggio 2016 / Accettato: 14 luglio 2016

Pubblicato online: 12 agosto 2016

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

© Associazione Acque Sotterranee 2016

Abstract: *The investigated area, located in the inner part of the Marche region (central Italy) and belonging to the carbonate Umbria-Marche ridges in the central Apennines, is characterised by very complex geo-structural setting and widespread karst phenomena that make difficult the definition of the relation among the aquifers basing only on the hydrogeological survey. Hence, the presence of different flowpaths among aquifers of the Umbria-Marche hydrostratigraphic sequence and of tectonic contacts among the different structures is verified using tracer tests. In particular, the tests showed that the Calcarea Massiccio and the Maiolica aquifers are connected under certain tectonic conditions.*

A new tracer given by a single stranded DNA molecule and traditional fluorescent dyes have been injected into the Montelago sinkhole in different periods (during the recharge and during the discharge) and recovered in several points along the expected hydrogeological basin, using either manual and automatic sampling. Fluorescent traps were positioned in creeks, rivers and springs. The DNA molecule is useful to trace surface water and groundwater, is detectable even at very low concentrations, no significant change in water density and viscosity can be observed and its use is not dangerous for the environment. The results stress the suitability of DNA as hydrogeological tracer, capable to identify connections among aquifers and study different flowpaths even in high flow conditions when traditional tracers are more and more diluted.

Moreover, fluorescein tracer allowed for the transport parameter determination, giving mean velocities ranging from 100 to 3000 m/day and mean residence time from some tens to hundreds of hours, and determining the aquifer volumes.

Introduzione

L'uso dei traccianti in idrogeologia rappresenta uno strumento piuttosto diffuso in campo internazionale (Field 2003; Goldscheider et al. 2008), meno in ambito nazionale (Tazioli and Palpacelli 2013), applicato soprattutto come supporto al rilievo idrogeologico per la risoluzione di problematiche relative alle direzioni di flusso delle acque sotterranee e all'individuazione di contatti idraulici tra corpi idrici differenti. In particolare, insieme alle metodologie isotopiche, le tecniche di tracciamento risultano indispensabili nella definizione della circolazione idrica sotterranea, nella stima dei parametri idrogeologici degli acquiferi e dei volumi in gioco. La loro applicazione, per contro, può richiedere un importante impegno economico e tecnico, e sicuramente necessita di una certa esperienza nel trattare i risultati e nell'impostare correttamente le prove (Tazioli and Palpacelli 2013).

Nel presente lavoro sono state utilizzate diverse tipologie di tracciante in un'area dell'Appennino centrale per verificare l'esistenza di contatti idraulici tra gli acquiferi carbonatici e tra le differenti idrostrutture che, sulla base dell'assetto litostrutturale, potrebbero essere considerate confinate.

L'area è ubicata nella parte centrale più interna della regione marchigiana (Fig. 1) che dal punto di vista geologico fa parte delle dorsali carbonatiche umbro-marchigiane, caratterizzate da pieghe e sovrascorrimenti dislocati da sistemi di faglie che rendono l'assetto geo-strutturale molto complicato (Calamita et al. 1991; Scisciani 2009). La complessità tettonica si riflette a sua volta sull'assetto idrogeologico, che soprattutto in alcune aree, risulta di difficile interpretazione (Nanni et al. 2013; Aquilanti et al. 2016). Anche il fenomeno del carsismo è da considerare con estrema attenzione nell'interpretazione della circolazione idrica sotterranea e nella ricerca di rapporti e relazioni idrauliche tra gli acquiferi.

Il presente studio si focalizza pertanto sulla ricerca e sulla dimostrazione dell'esistenza di contatti idraulici tra acquiferi di singole idrostrutture e tra idrostrutture diverse, mediante l'uso di traccianti: tematica dunque complessa e importante, riguardante gran parte degli acquiferi carbonatici dell'Italia centro-meridionale, il cui studio coinvolge competenze multidisciplinari.

Nel recente passato più autori hanno ipotizzato la possibilità di contatti idraulici tra diversi complessi idrogeologici in alcune aree dell'Appennino centrale tra cui Boni et al. (2009), non sempre però dimostrandone sperimentalmente l'esistenza. Nanni and Vivalda (2005) ad esempio, sulla base della facies chimica delle acque emergenti dalle dorsali carbonatiche, rilevano la presenza di miscelamenti tra acque provenienti da differenti acquiferi, resi possibili da contatti idraulici sviluppatasi in zone intensamente fratturate e fagliate. Inoltre, in aree in cui i sovrascorrimenti hanno portato i termini carbonatici su quelli della sequenza messiniana, gli stessi autori evidenziano continuità idraulica tra acquiferi carbonatici e terrigeni sulla base di un aumento del tenore salino delle acque sorgive arricchite in ioni cloro, sodio e solfati. Di fatto tale insieme di ipotesi è stato formulato essenzialmente sulla

base del chimismo delle acque e dell'assetto strutturale dell'area appenninica.

Anche alcuni studi isotopici, condotti per individuare le aree di ricarica degli acquiferi in diverse aree dell'Italia centrale riportano valori abbastanza mediati, con variazioni a volte poco significative, evidenziando miscelamenti tra acque sotterranee di diversa provenienza (Nanni et al. 2013).

Sebbene esistano quindi studi sulle dorsali carbonatiche appenniniche, che hanno contribuito ad una migliore comprensione delle modalità con cui avviene la circolazione idrica sotterranea, ulteriori dati sperimentali sono necessari per ricostruire e cogliere appieno il modello idrogeologico. In particolare gli studi finora condotti hanno sottolineato la necessità di integrare i risultati del rilievo idrogeologico e strutturale con dati di altre indagini, che consentano di identificare con maggior precisione i contatti idraulici esistenti, ponendo in rilievo le modalità dei diversi percorsi di flusso ipotizzati sulla base dell'osservazione e dell'analisi degli idrogrammi sorgivi.

Allo scopo di dimostrare quindi l'esistenza di contatti idraulici tra gli acquiferi di idrostrutture diverse, è stata selezionata l'area del piano di Montelago (MC) in cui è presente un inghiottitoio carsico che consente l'immissione di traccianti in periodi diversi dell'anno, e che è ritenuto potenzialmente collegato a sorgenti lineari e puntuali emergenti dai diversi acquiferi della zona (Fig. 1).

Vengono presentati sinteticamente i risultati di 5 campagne di misura effettuate tra il 2011 e il 2016 mediante utilizzo di traccianti biologici (molecole di DNA sintetico) e fluorescenti (fluoresceina sodica e Tinopal CBS-X); i dati delle campagne di misura del 2011 e del 2016 e, in parte del 2012 sono ad oggi inediti. Le proprietà dei traccianti fluorescenti ed elettrolitici sono note da tempo in letteratura (Field 2003; Leibundgut et al. 2009; Tazioli and Palpacelli 2013), mentre per quanto riguarda le molecole di DNA sono state usate in alcuni lavori in campo idrologico e idrogeologico quali-quantitativo da Sabir et al. (1999), Aquilanti et al. (2013, 2016). Da questi ultimi studi è risultato che le molecole di DNA sono in grado di tracciare il flusso delle acque sotterranee negli acquiferi carbonatici, hanno il grande vantaggio di essere rilevabili anche a bassissime concentrazioni, oltre a non indurre un significativo cambiamento nella densità e viscosità dell'acqua e non essere pericolose per l'ambiente; alcuni svantaggi nel loro uso risiedono invece in un tempo di vita limitato della molecola (poco più di un mese) e nel suo comportamento idrodinamico, legato alla sua non solubilità in acqua e quindi maggiormente orientato verso un comportamento idrodispersivo puro (Ptak et al. 2004, Aquilanti et al. 2016).

Materiali e Metodi

Assetto idrogeologico dell'area di studio

L'area in studio è compresa tra l'alta valle dei fiumi Chienti e Potenza, in destra idrografica del fiume (F.) Scarzito, affluente del Potenza, i cui principali tributari sono dati da piccoli ruscelli perenni quali Valle Scurosa, fosso di Agolla, fosso di San Giovanni. Quest'ultimo nasce dalla risorgiva carsica del

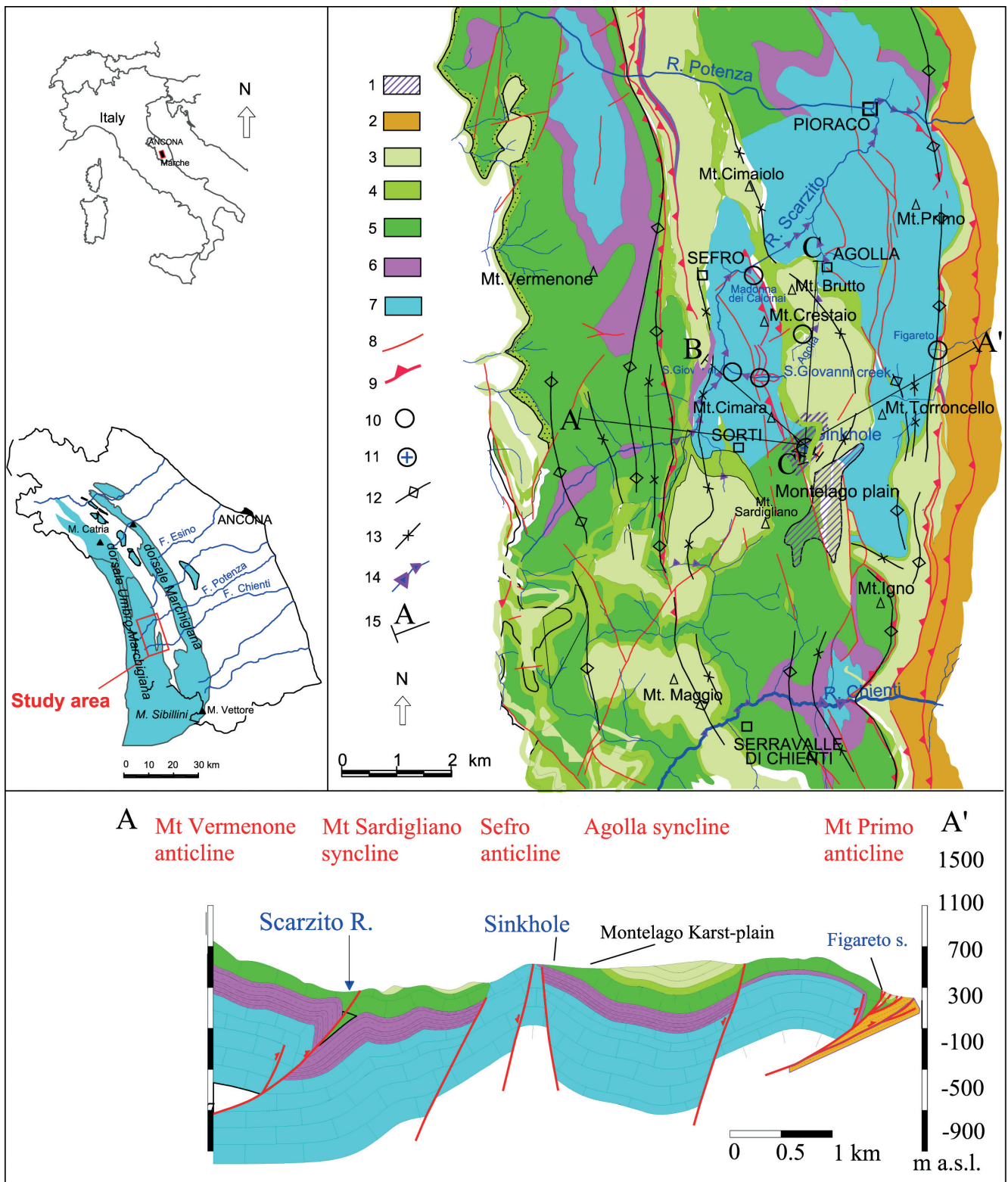


Fig. 1 - A sinistra: ubicazione dell'area in studio. A destra: carta idrogeologica dell'area in studio (da Aquilanti et al. 2016, modificato). Sotto: sezione geologica A-A'.
 Legenda: 1- Piano di Montelago, 2- Acquiclude della Scaglia cinerea, Bisciario e Schlier, 3- Acquifero della Scaglia, 4- Acquiclude delle Marne a Fucoidi, 5- Acquifero della Maiolica, 6- Acquiclude giurassico, 7- Acquifero del Calcare Massiccio, 8- faglia normale, 9- sovrascorrimento, 10- sorgente, 11- inghiottitoio, 12- asse di anticlinale, 13- asse di sinclinale, 14- sorgente lineare, 15- traccia di sezione.

Fig. 1 - On the left: location of the investigated area; on the right: hydrogeological map of the investigated area (after Aquilanti et al. 2016, modified). Legend: 1- Montelago karst plain, 2- Scaglia cinerea, Bisciario and Schlier aquiclude, 3- Scaglia aquifer, 4- Marne a Fucoidi aquiclude, 5- Maiolica aquifer, 6- Jurassic aquiclude, 7- Calcare Massiccio aquifer, 8- Normal fault, 9- Overthrust, 10- Spring, 11- Sinkhole, 12- Anticline axis, 13- Syncline axis, 14- Linear spring, 15- section track.

Grottone, poco meno di 2 km a Nord-Ovest dell'inghiottitoio del piano di Montelago (Fig. 1).

L'area geologicamente fa parte delle dorsali meso-cenozoiche umbro-marchigiane (Centamore and Micarelli, 1991) la cui sequenza inizia con il Calcere Massiccio e la Corniola (sede del più importante complesso idrogeologico umbro-marchigiano) e prosegue con i calcari marnosi, marne, e marne argillose del gruppo giurassico infra-cretacico che, nella successione completa, fungono da acquiclude tra acquifero del Massiccio e soprastante acquifero dei calcari della Maiolica.

Al tetto le Marne a Fucoidi separano idraulicamente l'acquifero della Maiolica dai soprastanti calcari e calcari marnosi del complesso idrogeologico della Scaglia. Le marne e marne argillose della Scaglia cinerea, Bisciario e Schlier infine, costituiscono l'acquiclude per gli acquiferi della dorsale carbonatica (Fig. 1).

L'assetto strutturale dell'area (Calamita et al. 1991; Scisciani 2009; Nanni et al. 2013; Pierantoni et al. 2013), risponde al classico stile tettonico a pieghe e sovrascorrimenti dislocati da sistemi di faglie ad andamento appenninico ed antiappenninico. Nell'area di Montelago, inserita nel contesto della macro anticlinale umbro-marchigiana, possono essere riconosciute le seguenti strutture tettoniche (da Est ad Ovest): anticlinale di M. Primo, sinclinale di Agolla, anticlinale di Sefro, sinclinale di M. Sardigliano, anticlinale di M. Vermenone (Fig. 1). Tali strutture, finora ritenute presumibilmente isolate, condizionano fortemente l'assetto idrogeologico della zona.

Il carsismo è sviluppato nell'area, con forme date da pozzi verticali, grotte, inghiottitoi, soprattutto nel Calcere Massiccio, più raramente nella Maiolica e nella Scaglia (Galdenzi et al. 2008). In particolare, il bacino endoreico di Montelago rappresenta una delle più importanti piane carsiche delle Marche con fenomeni di epicarsismo e carsismo profondo ben sviluppati. È dato da due altopiani carsici, ad una quota media di circa 900 m s.l.m., con estensione di poco inferiore a 2 km². In corrispondenza dell'inghiottitoio, sviluppatosi nella Maiolica, si ha una depressione morfologica che guida stagionalmente il flusso delle acque superficiali che si infiltrano rapidamente nella cavità carsica sotto forma di piccolo ruscello (Fig. 2); in alcuni periodi dell'anno si forma un vero e proprio lago che favorisce un'infiltrazione piuttosto lenta delle acque meteori-

che all'interno dell'inghiottitoio. Queste caratteristiche hanno guidato la programmazione delle prove di tracciamento, eseguite quindi nella fase di maggiore attività dell'inghiottitoio. Nell'area infine si hanno diverse sorgenti captate ad uso idropotabile, quali Figareto, Agolla, S. Giovanni e Madonna dei Calcaini e lineari lungo i fiumi Scarzito e Potenza (Fig.1), tutte utilizzate nell'ambito di questa indagine come punti di misura dell'arrivo dei traccianti.

Traccianti utilizzati

I traccianti usati nel corso dello studio sono DNA, fluoresceina e Tinopal. La molecola di DNA usata è una molecola a singolo filamento costituita da 72 nucleotidi, precedentemente descritta da Aquilanti et al. (2013). È stata sintetizzata, purificata mediante high performance liquid chromatography (HPLC) e inviata in forma liofilizzata con una resa finale pari a circa 1017 molecole. La rilevazione e quantificazione del tracciante sintetico è stata effettuata mediante PCR quantitativa (qPCR), come descritto da Aquilanti et al. (2013).

La fluoresceina sodica è un tracciante fluorescente molto usato in idrogeologia e idrologia per la sua alta solubilità, il facile impiego ed un limite di rilevabilità vicino a 2×10^{-6} mg/L con i comuni strumenti da laboratorio. Ha una lunghezza d'onda di emissione tra 515 e 525 nm ed un picco di eccitazione a 494 nm. Il Tinopal CBS-X è un tracciante fluorescente della famiglia degli sbiancanti ottici, molto usato soprattutto in speleologia (Riva 1999; Uggeri and Vigna 1990) ha il vantaggio di non essere visibile ad occhio umano a certe concentrazioni (inferiori a circa 10 mg/L) ma è fotosensibile. La sua lunghezza d'onda di emissione è circa 440 nm, quella di eccitazione tra 365 e 370 nm. La determinazione della concentrazione dei traccianti fluorescenti è avvenuta in laboratorio usando un fluorimetro a filtri Perkin Elmer LS-2 (PerkinElmer, Waltham, MA, USA) e direttamente in campagna mediante lo strumento portatile Albillia GGUNFL30 (Albillia Co, Neuchâtel, Switzerland). Per ogni punto di misura sono state determinate le curve di taratura concentrazione-unità fluorimetriche (ricavate mediante standard preparati usando la stessa acqua del punto di misura), necessarie per eseguire analisi quantitative delle prove di tracciamento.



Fig. 2 - Veduta del piano di Montelago con ubicazione dell'inghiottitoio carsico (sinistra); particolare dell'inghiottitoio (destra).

Fig. 2 - Landscape of the Montelago karst plain with the location of sinkhole (left); detail of sinkhole (right).

Metodi di misura e campionamento

Nel presente lavoro sono illustrate due tipologie di prove differenti, la prima di carattere prevalentemente qualitativo (con lo scopo cioè di individuare le direzioni di deflusso sotterraneo in diverse condizioni idrogeologiche e di scegliere i punti in cui effettuare le prove di tipo quantitativo), la seconda di tipo quantitativo, volta cioè a ricavare le velocità di deflusso e i volumi di acquifero tracciato. La prima tipologia di prove è stata utilizzata anche per definire i contatti idraulici tra i differenti acquiferi e idrostrutture.

Le prove di tracciamento sono state eseguite immettendo istantaneamente diversi tipi e quantità di traccianti nell'inghiottitoio di Montelago e rilevandone l'arrivo in 10 diversi punti (Fig. 3, Tab. 1) mediante differenti metodologie, in alcune prove determinando la concentrazione effettiva nei campioni prelevati in determinati punti dell'area indagata, in altre individuando l'arrivo o meno del tracciante mediante fluocaptori. Alcuni test sono stati effettuati immettendo simultaneamente traccianti di tipo diverso, dopo averne indagato eventuali interferenze, come riportato in Aquilanti et al. (2016). La rilevazione della concentrazione è avvenuta o direttamente sui campioni prelevati a intervalli regolari oppure determinando la presenza o meno del tracciante sul liquido estratto dai fluocaptori. In concomitanza di ciascuna prova di tracciamento è stata anche misurata la portata dei principali punti monitorati (corsi d'acqua, sorgenti) per mezzo di mulinello idrometrico (SIAP ME-4001) e/o traccianti artificiali. La prima tipologia di test (di tipo qualitativo) ha previsto l'immissione di fluoresceina nell'inghiottitoio e il rilievo dell'arrivo del tracciante mediante fluocaptori; ogni captore (costituito da filtri di carbone attivo inseriti in contenitori porosi) è stato sostituito mediamente ogni 3-4 giorni in modo da ricavare una stima di massima del tempo di arrivo del tracciante.

La seconda tipologia di test, di tipo quantitativo, è stata eseguita immettendo nell'inghiottitoio in modo istantaneo, in diversi periodi (anche simultaneamente) DNA, Tinopal CBS-

X e fluoresceina (tra 50 e 550 g per i traccianti fluorescenti). Il rilievo delle concentrazioni di traccianti in questo caso ha riguardato solo alcuni dei punti di monitoraggio (in particolare i punti 4, 5, 6, 7, 8, 9). L'interpretazione dei risultati è avvenuta mediante il software QTracer2 (Field 2003) e un foglio elettronico (MS Excel); QTracer applica il metodo dei momenti per ricavare i volumi di acquifero tracciato, le velocità medie del tracciante e i tempi di trasferimento. Le caratteristiche relative alle metodologie di prova sono riassunte in Tab. 2.

Risultati e Discussione

Dalla prima tipologia di test, basata sul rilievo qualitativo del tracciante, emerge un quadro abbastanza preciso delle direzioni di deflusso delle acque sotterranee (Fig. 3): rilievo positivo di tracciante in direzione Nord-Ovest e Nord-Est in tutte le condizioni di prova e rilievo negativo in direzione Sud (lungo il F. Chienti), anche dopo circa due mesi dall'immissione. In alcuni casi si è avuto rilievo positivo di tracciante in direzione Nord (sorg. Agolla), quando probabilmente le condizioni idrauliche sono state tali da favorire un collegamento tra inghiottitoio (ubicato nella Maiolica) e sorgente di Agolla (acquifero della Scaglia); in particolare ciò si è verificato sia in condizioni di ricarica sia al termine del periodo di ricarica, con quantitativi di traccianti del tutto confrontabili. Questo sta a dimostrare che, con un livello piezometrico piuttosto elevato, l'acquifero della Maiolica, parzialmente in pressione, probabilmente tramite fratturazione e faglie a direzione prevalentemente anti-appenninica è in contatto idraulico con quello della Scaglia soprastante. Tale risultato, conseguito con il nuovo test eseguito nel 2016, è particolarmente importante in quanto convalida la presenza di un collegamento idraulico precedentemente solo supposto o individuato con grande margine di errore.

I risultati quantitativi ottenuti nella seconda tipologia di test riguardano solo alcuni dei punti monitorati, in particolare

Tab. 1 - Distanze dei punti monitorati dal punto di immissione.

Tab. 1 - Distance of monitoring points from the injection. 1-V. Scarosa creek, 2- Scarzito lin. Springs, 3- Sorti brook, 4- S.Giovanni creek, 5- S.Giovanni spring, 6- Agolla spring, 7- M. dei Calcinai spring, 8- Potenza lin. Springs, 9- Figareto spring, 10- Chienti lin. springs.

Punto di monitoraggio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Distanza (km)	2.6	2.4	1.6	1.8	2	2.5	3.4	6.9	3.5	5.6

Tab. 2 - Caratteristiche delle prove di tracciamento.

Tab. 2 - Properties of tracer tests.

Test	Jan 2011	May 2011	May 2012	April 2013	April 2016
Massa del tracciante immesso (g)	200 (Fluoresceina)	150 (Fluoresceina)	150 (Tinopal, Fluoresceina), 10 ¹⁶ mol (DNA)	300 (Tinopal, Fluoresceina), 10 ¹⁶ mol (DNA)	550 (Fluoresceina)
Durata del monitoraggio (giorni)	21	32	35	38	55
% di tracciante di tutti i punti monitorati	81	69	41	63	65
Condizioni idrogeologiche	ricarica	magra	ricarica	ricarica	fine della ricarica

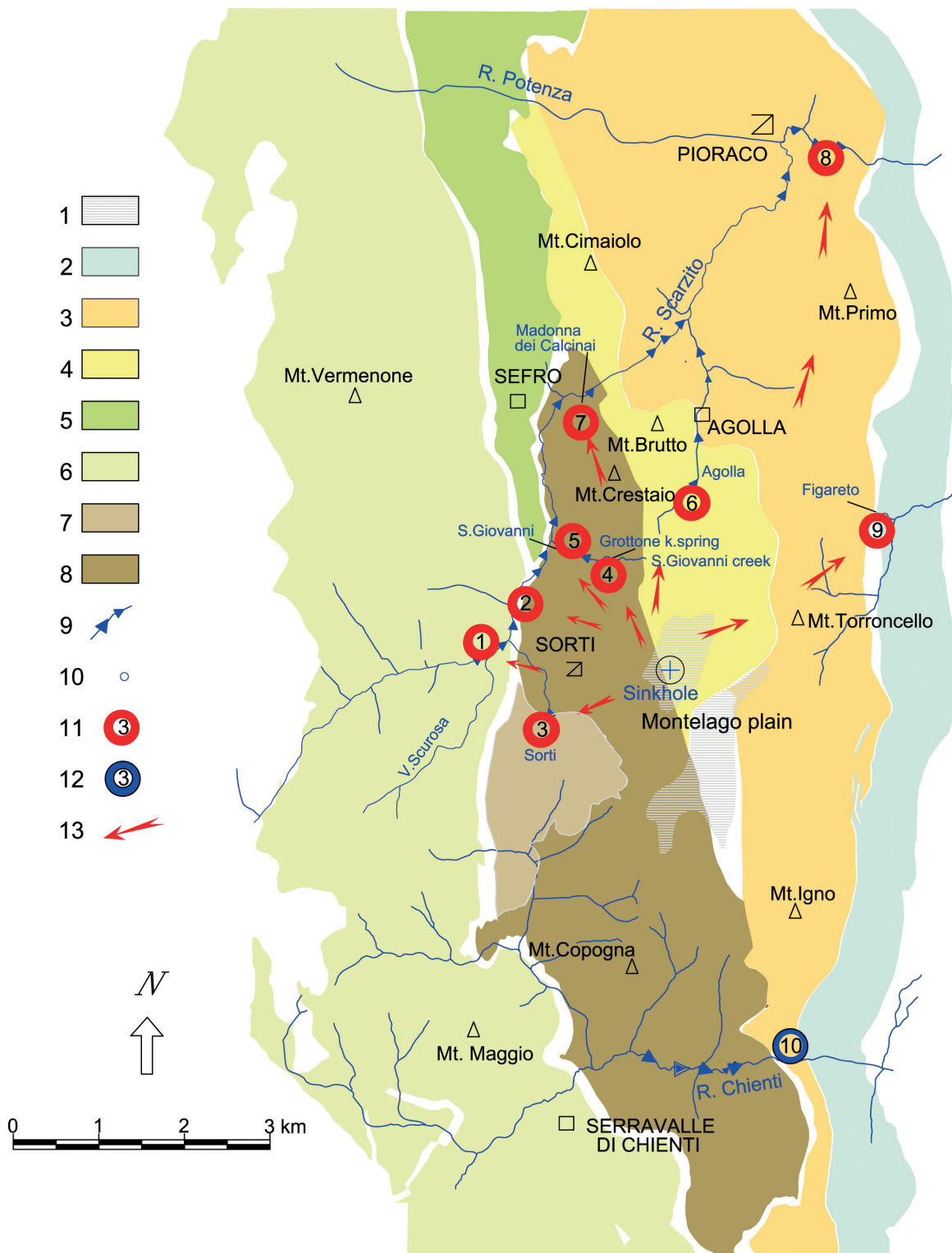


Fig. 3 - Mappa dei risultati della prima tipologia di test (qualitativi) indicante le direzioni preferenziali di deflusso delle acque sotterranee (da Aquilanti et al. 2016, modificato). **Legenda:** 1- Piano di Montelago, 2- Acquiclude della Scaglia cinerea, Bisciaro e Schlier, 3- Idrostruttura di M. Primo, 4- Idrostruttura di Agolla, 5- Idrostruttura di S. Cassiano, 6- Idrostruttura di M. Vermenone, 7- Idrostruttura di M. Sardigliano, 8- Idrostruttura di Sefro, 9- Sorgente lineare, 10- Sorgente, 11- Punto di campionamento (segnale positivo), 12- Punto di campionamento (segnale negativo), 13- Direzione di deflusso. La legenda dei punti di campionamento è riportata in Tab. 1

Fig. 3 - Map with the results of the first series of tests (qualitative tests, after Aquilanti et al. 2016, modified), indicating the preferential flowpaths. **Legend:** 1- Montelago karstplain, 2- Aquiclude, 3- Mt Primo hydrogeological structure, 4- Agolla hydrogeological structure, 5- S. Cassiano, 6- Mt Vermenone hydrogeological structure, 7- Mt Sardigliano hydrogeological structure, 8- Sefro hydrogeological structure, 9- Linear spring, 10- Spring, 11- Sampling point (positive signal), 12- Sampling point (negative signal), 13- Flowpath. The legend of monitoring points is reported in Tab. 1.

quelli per cui è stato possibile (a causa delle modalità di campionamento e di misura del tracciante) applicare un bilancio di massa quantitativo alle prove; sono sintetizzati in Figg. 4 e 5 e rappresentati mediante le curve di restituzione dei traccianti nel tempo. In Fig. 4 sono riportati in particolare i risultati della restituzione di tracciante nel f.so di S. Giovanni in diverse condizioni di portata. Il f.so S. Giovanni, alimentato dalla risorgiva carsica del Grottone, scorre in adiacenza alla

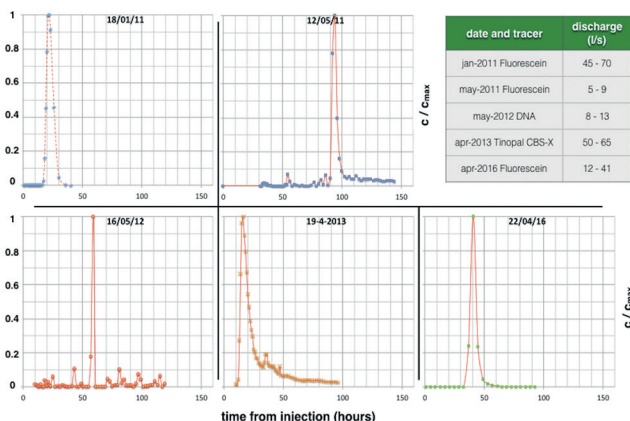


Fig. 4 - Risultati di alcune prove della seconda serie di test (quantitativi) relative al f.so S. Giovanni (punto n. 4 in Fig. 3) in diverse condizioni di portata e con l'utilizzo di diversi traccianti; curve di restituzione dei traccianti con tabella relative al periodo di esecuzione delle prove e alle portate del f.so S. Giovanni.

Fig. 4 - Quantitative Tracer tests results (2nd series of tests) in the S. Giovanni creek (point n. 4 in Fig. 3) in different discharge conditions and using different tracers; plot of the tracer breakthrough curves and table indicating the discharge and the period of the tests.

sorgente S. Giovanni, captata ad uso potabile ed è il punto più vicino all'inghiottitoio, significativo quindi per quanto riguarda il collegamento di tipo carsico con i piani di Montelago e pertanto monitorato fin dall'inizio della ricerca in modo particolareggiato. I risultati qui presentati ne evidenziano il comportamento tipico di una risorgiva carsica: il picco della curva di restituzione arriva, infatti, in tempi diversi a seconda del regime idrologico e idrogeologico, l'andamento è abbastanza impulsivo con presenza di picchi secondari di entità minore sia prima che dopo l'arrivo del picco principale. I tempi di arrivo del baricentro della nube tracciante variano tra 11 e 62 ore. Tale differenza sembra essere correlata in primis alla portata in uscita dal sistema carsico superficiale (rilevata nel f.so S. Giovanni), secondariamente al periodo idrogeologico di effettuazione delle misure. In Fig. 5 sono riportati i risultati della sola prova di tracciamento del 2016 in cui sono stati monitorati in continuo il f.so S. Giovanni (punto n. 4), le sorgenti puntuali di S. Giovanni (5), Agolla (6) e Figareto (9) e le sorgenti lineari del F. Potenza (8). Il tracciante è stato rilevato dopo circa 40 ore nel f.so S. Giovanni, mentre nelle sorgenti lineari del F. Potenza il suo arrivo è stato registrato dopo circa un mese. La forma della curva di restituzione è simile in tutti i casi, caratterizzata da una discesa un po' meno rapida rispetto alla salita ed a volte si sono registrati picchi secondari di

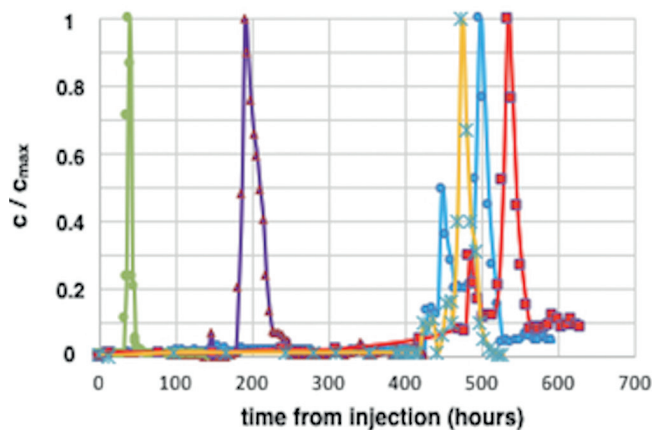


Fig. 5 - Risultati della campagna del 2016 condotta con la fluoresceina (seconda serie di tests quantitativi). 4- F.so S. Giovanni, 6- Sorgente Agolla, 5- Sorgente S. Giovanni, 9- Sorgente Figareto, 8- Sorgenti lineari del F. Potenza.

Fig. 5 - Results of the 2nd series of tests (quantitative, 2016, using fluorescein). 4- S. Giovanni creek, 6- Agolla spring, 5- S. Giovanni spring, 9- Figareto spring, 8- Linear springs of the Potenza River.

minore entità rispetto al principale. Quest'ultimo aspetto può essere collegato all'esistenza di diversi percorsi di flusso, alcuni più veloci (legati al carsismo superficiale), che si manifestano con il picco principale di arrivo della maggior parte del tracciante immesso, ed altri più lenti (legati alla circolazione della falda basale) che vanno ad interessare gli ingenti volumi idrici immagazzinati. Le velocità medie di transito del tracciante sono comprese tra alcuni metri ed alcuni km al giorno, a seconda del circuito interessato e del periodo idrologico (Tab. 3). I risultati dei test quantitativi hanno inoltre permesso di formulare una stima dei volumi di acquifero tracciati per le diverse idrostrutture, calcolati mediante il programma QTracer2 (Field 2003): valori massimi di circa $0.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ per l'idrostruttura di M. Primo e circa $0.1 \times 10^6 \text{ m}^3$ per quella di Sefro; in condizioni di magra tali valori diminuiscono di circa un ordine di grandezza.

Particolare attenzione va posta all'osservazione dei dati inediti del 2011, 2016 e, in parte, 2012, che permettono di formulare alcune nuove considerazioni. Essi confermano, infatti, la presenza di alcuni contatti idraulici che avvengono soltanto in determinate condizioni idrogeologiche, come ad esempio quelli tra inghiottitoio e struttura di Agolla. Inoltre, il tracciante sintetico, diversamente dagli altri traccianti usati, ha in questo caso permesso l'individuazione sicura della presenza di collegamenti tra l'inghiottitoio e i punti monitorati lungo il F. Potenza, la sorgente Figareto e la sorgente Agolla in tutti i test condotti. In particolare la Fig. 6 riporta, a titolo esemplificativo, l'andamento della prova del maggio 2012 (condizioni di magra) nel f.so S. Giovanni relativa al tracciamento con Tinopal e DNA. Come si può osservare il tracciante sintetico descrive una curva di restituzione con un picco ben definito, mentre dell'altro è difficile individuare un andamento chiaro. In condizioni di ricarica, quando i volumi di acqua interessati

dalla prova di tracciamento sono notevolmente aumentati, il tracciante sintetico inoltre dà migliori indicazioni sulla presenza di collegamenti rispetto a quelli tradizionali (anche se utilizzati in dosi più massicce). Quest'ultima affermazione si è verificata ad esempio nei punti monitorati del F. Potenza (8), nella sorgente di Agolla (6), nelle sorgenti lineari del F. Scarzito (2), dove il DNA è stato individuato con sicurezza (valori superiori a un ordine di grandezza oltre il suo limite di rilevabilità) mentre Tinopal e fluoresceina in alcuni casi non venivano distinti (avendo i campioni valori di fluorescenza molto vicini al fondo strumentale).

Tab. 3 - Volumi di acquifero tracciato e velocità di transito del tracciante nelle diverse idrostrutture, in diverse condizioni (magra e ricarica); dati sperimentali modellati col software QTracer2.

Tab. 3 - Aquifer volume and mean tracer velocity in different hydrogeological systems and different hydrologic conditions; experimental data modelled by the QTracer2 software.

Sistema idrogeologico	Stima del volume totale della falda acquifera (milioni di m ³)		Velocità media del tracciante (m/giorno)	
	Min	Max	Min	Max
Anticlinale di Sefro	0.109	0.185	160	3080
Sinclinale di Agolla	0.034	0.071	161	
Anticlinale di M. Primo	0.476	0.631	68	329

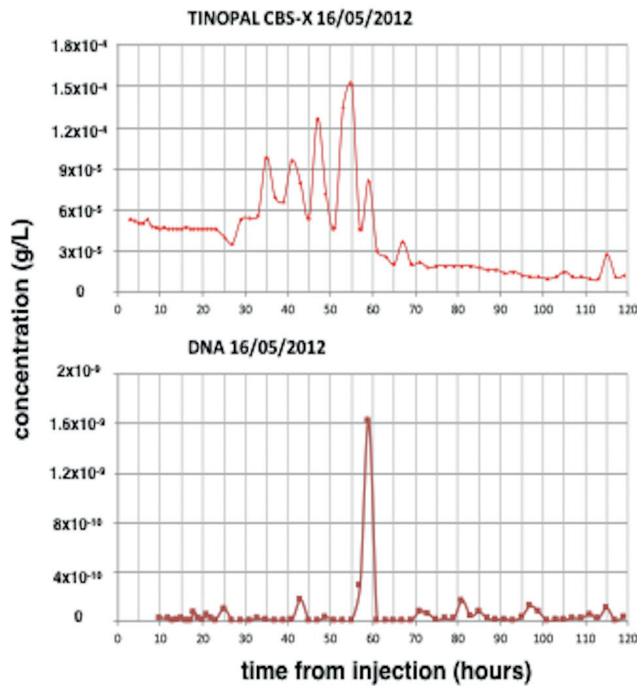


Fig. 6 - Iniezione simultanea di traccianti nel f.so S. Giovanni (4): confronto tra DNA e Tinopal.

Fig. 6 - Parallel injection of tracers in the S. Giovanni creek (4): comparison between DNA and Tinopal.

Conclusioni

I risultati delle prove di tracciamento condotte dal 2011 ad oggi hanno permesso di dimostrare l'esistenza di contatti idraulici attraverso faglie e carsismo, tra differenti acquiferi della sequenza carbonatica umbro-marchigiana appartenenti sia ad una stessa idrostruttura, sia ad idrostrutture contigue in contatto tettonico tra loro. Hanno consentito inoltre di identificare in uno stesso acquifero circuiti di flusso differenziati, più veloci legati al carsismo superficiale, e più lenti connessi al flusso di base delle strutture idrogeologiche.

Nell'area di Montelago, di particolare rilevanza è stata la dimostrazione dell'esistenza di collegamenti idraulici, finora solo supposti, tra la Maiolica dell'idrostruttura di Sefro e la Scaglia di quella di Agolla, e fra le idrostrutture di Sefro e di M. Primo, ad ulteriore conferma del fatto che i traccianti sono uno strumento indispensabile in idrogeologia. Uno schema concettuale della circolazione idrica sotterranea ricavata in seguito alle diverse prove di tracciamento eseguite durante questa indagine è riportato in Fig. 7.

Infine, l'uso di molecole di DNA come tracciante idrogeologico si è rivelato di sicuro interesse nell'area studiata, permettendo di ottenere informazioni sia in condizioni di ricarica, in presenza di grandi volumi di acqua tracciata, sia in condizioni di magra; tale tracciante, ha un limite di rilevabilità molto più basso rispetto ai traccianti tradizionali. Ulteriori prove in condizioni diverse ed in altri tipi di acquiferi potranno valdarne ulteriormente il comportamento.

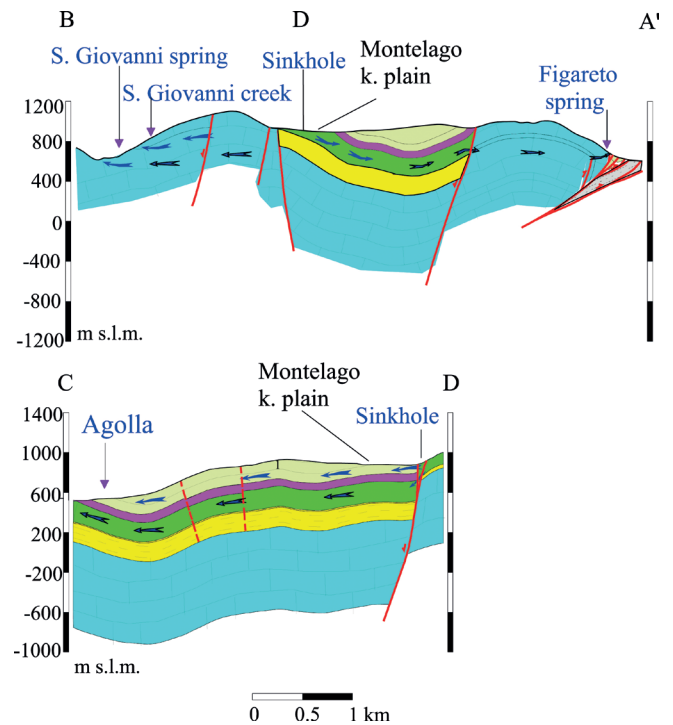


Fig. 7 - Schema concettuale di circolazione idrica sotterranea nell'area indagata. Legenda e traccia delle sezioni in Fig. 1.

Fig. 7 - Conceptual model of groundwater circulation in the investigated area. Legend and section tracks are reported in Fig. 1.

BIBLIOGRAFIA

- Aquilanti L., Clementi F., Landolfo S., Nanni T., Palpacelli S., Tazioli A. (2013). A DNA tracer used in column tests for hydrogeology applications. *Environmental earth sciences* 70(7): 3143-3154.
- Aquilanti L., Clementi F., Nanni T., Palpacelli S., Tazioli A., Vivalda P.M. (2016). DNA and fluorescein tracer tests to study the recharge, groundwater flowpath and hydraulic contact of aquifers in the Umbria-Marche limestone ridge (central Apennines, Italy). *Environmental Earth Sciences* 75:626 – doi: 10.1007/s12665-016-5436-5.
- Boni C., Tarragoni C., Martarelli L., Pierdominici S. (2009). Hydrogeological study of the Monti Sibillini north-western sector (central Italy): a contribution to the official hydrogeologic mapping. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment* 1: 16. DOI 10.4408/IJEGE.2009-01.O-01.
- Calamita F., Cello G., Centamore E., Deiana G., Micarelli A., Paltrinieri W., Ridolfi M. (1991). Stile deformativo e cronologia della deformazione lungo tre sezioni bilanciate dell'Appennino umbromarchigiano della costa adriatica. "*Deformative style and cronology of deformation along three balanced sections of Umbria-Marche Apennines in the adriatic shore*". *Studi Geol Camerti* 1991/1: 295-314.
- Centamore E., Micarelli A. (1991). Stratigrafia. "*Stratigraphy*". In: Marche R. (ed) *L'ambiente fisico delle Marche. Geologia, Geomorfologia, Idrogeologia*. SELCA:1-66.
- Field M.S. (2003). A review of some tracer-test design equations for tracer-mass estimation and sample-collection frequency. *Environ Geol* 43: 867-881.
- Galdenzi S., Paggi S., Pistolesi E., Cotechini G. (2008). Le grotte di Sefro: guida al carsismo del territorio di Sefro. "*The Sefro caves: guide to karst of the Sefro area*". Jesi, pp. 24.
- Leibundgut C., Maloszewski P., Kulls C. (2009). *Tracers in hydrology*. WILEY BLACKWELL, London.
- Goldscheider N., Meiman J., Pronk M., Smart C. (2008). Tracer tests in karst hydrogeology and speleology. *International Journal of Speleology* 37: 27-40.
- Nanni T., Tazioli A., Vivalda P.M. (2013). Problems in the application of environmental isotopes to the hydrogeology of high mountain aquifers. *AquaMUNDI* 4: 55-66. DOI 10.4409/Am- 055-13-0052.
- Nanni T., Vivalda P.M. (2005). The aquifers of the Umbria-Marche adriatic region: relationships between structural setting and groundwaters chemistry. *Boll Soc Geol It* 124: 24-37.
- Pierantoni P.P., Deiana G., Galdenzi S. (2013). Geological map of the Sibillini mountains (Umbria -Marche Apennines, Italy). *Italian J of Geosc* 132(3): 497-520.
- Ptak T., Piepenbrink M., Martac E. (2004). Tracer tests for the investigation of heterogeneous porous media and stochastic modelling of flow and transport-a review of some recent developments. *J Hydrol* 294: 122-163.
- Riva A. (1999). Tinopal CBS-X: un tracciante per lo studio degli acquiferi carsici "*Tinopal CBS-X: a tracer for the study of karstic aquifers*". *Speleologia Veneta* 7: 73-80.
- Sabir I.H., Torgersen J., Haldorsen S., Aleström P. (1999). DNA tracers with information capacity and high detection sensitivity tested in groundwater studies. *Hydrogeol J* 7(3): 264-272.
- Scisciani V. (2009). Styles of positive inversion tectonics in the Central Apennines and in the Adriatic foreland: Implications for the evolution of the Apennine chain (Italy). *J Struct Geol* 31: 1276-1294.
- Tazioli A., Palpacelli S. (2013). Scelta del tracciante ideale per indagini idrogeologiche: risultati preliminari da test in laboratorio "*The tracer ideal choice for hydrogeological investigations: preliminary results from laboratory tests*". *Acque Sotterranee Italian Journal of Groundwater* 2: 7- 12. DOI 10.7343/AS-021-13-0000.
- Uggeri S., Vigna B. (1990). Un tracciante alternativo nello studio degli acquiferi carsici: il Tinopal "*An alternative tracer in the study of karst aquifers: Tinopal*". *Le Grotte d'Italia, Atti XVI Congresso Nazionale di Speleologia, Udine, (4) XVI, pp. 289-302.*